

objet profilé comme une aile d'avion, si l'angle entre l'aile et la direction du déplacement devient trop important, la couche limite se décolle : c'est le décrochage. Une zone de turbulence apparaît autour de l'objet et la différence de pression s'annule. La main d'un nageur est-elle assez fuselée, et présente-t-elle un angle d'attaque assez petit pour empêcher le décollement de la couche limite ? Plusieurs expériences conduites dans les années 1990 montrent le contraire.

En 1991, en attachant des fils de laine à une main artificielle en résine immergée selon des angles d'attaque variés, Michael Ferrel, au Collège Cortland, aux États-Unis, a constaté que les fils se meuvent de façon chaotique. La couche limite s'est donc décollée, et un écoulement désordonné entoure la main. Il en est de même quels que soient la vitesse de la main ou son angle d'attaque. En 2002, l'ingénieur américain Barry Bixler a obtenu des résultats analogues en utilisant une autre technique : une simulation numérique, à l'aide des équations de la mécanique des fluides, de l'interaction eau-main.

Contester l'applicabilité du théorème de Bernoulli à la propulsion du nageur ne signifie pas pour autant nier tout rôle à la portance. L'inclinaison de la main par rapport à la direction de la vitesse donne nécessairement à la résultante des forces de pression une composante orthogonale à la vitesse. Et si un autre phénomène donnait une importance particulière à la portance ? Au moment où les bernouillistes perdent du terrain, une nouvelle idée retient l'attention : la théorie du vortex. Les enregistrements vidéo subaquatiques ont en effet mis en évidence les tourbillons importants que produisent les nageurs.

Principalement défendue par Cecil Colwin (1984), entraîneur olympique en Afrique du Sud, puis au Canada, cette théorie est fondée sur une analogie avec le mode de propulsion des poissons : il se formerait, autour de la main et des jambes de l'athlète, des tourbillons similaires à ceux produits par la nageoire caudale d'un poisson en mouvement (voir la figure 5). Le cycle du bras du nageur (ou de la nageoire caudale) est divisé en deux phases.

Durant la première, la main (ou la nageoire) se comporte comme une aile d'avion. D'après les lois de l'aérodynamique, il se forme à l'arrière de l'aile un tourbillon dit de démarrage, dû à l'écoulement de l'air de la zone de haute pression (sous l'aile) vers la zone de basse pression

(au-dessus). Ce tourbillon de démarrage engendre autour de l'aile un autre tourbillon de sens de rotation opposé, nommé tourbillon lié. En raison de son sens de rotation, le tourbillon lié augmente la vitesse de l'air situé sur l'aile et diminue celle de l'air situé sous l'aile, rendant encore plus importante la différence de pression entre le dessus et le dessous de l'aile et, par conséquent, la portance. Selon les tenants de la théorie du vortex, il se forme autour de la main du nageur un système tourbillonnaire de ce type, et la propulsion dériverait essentiellement de la portance.

...ainsi que pour le vortex

Un tourbillon lié ne peut toutefois être maintenu à l'infini. La seconde phase du mécanisme entre alors en action : lorsque la main change de direction, le tourbillon de démarrage se détache et se dirige vers l'arrière. En vertu de la troisième loi de Newton, il se produit alors, en réaction au détachement de cette masse vers l'arrière, une accélération du corps vers l'avant.

La théorie du vortex a suscité des objections. Il est difficile de démontrer la

présence de tourbillons liés autour de la main du nageur. Cette théorie implique aussi l'existence d'accélération lorsque la main change de direction. Or les mesures ont au contraire montré que le barycentre de l'athlète décélère durant les changements de direction de la main, et que les accélérations se produisent à peu près à la moitié de la phase propulsive.

Ces mesures sont effectuées à partir d'enregistrements vidéo d'athlètes, au moyen de logiciels d'analyse biomécanique, ou encore grâce à des capteurs microélectromécaniques (MEM). Ces minuscules dispositifs de mesure, qui contiennent un accéléromètre et un gyroscope triaxiaux, sont placés dans une ceinture ou un bracelet. Les données mesurées, c'est-à-dire les accélérations le long des trois axes et les vitesses angulaires autour de ces axes, sont traitées par des algorithmes complexes pour fournir d'autres informations utiles : vitesse, fréquence du cycle du bras, roulis, symétrie droite-gauche, etc.

Les profils d'accélération et de décélération obtenus par ces mesures semblent cohérents avec la théorie de la traînée : dans ce modèle, lors d'un changement de

DÉPART ET VIRAGE

Le départ, le virage et la phase de glisse subaquatique sont trois phases fondamentales et souvent décisives lors d'une compétition. Certains champions, tel Michael Phelps, se détachent de leurs concurrents grâce à leur maîtrise parfaite de ces trois gestes techniques. Les entraîneurs et les techniciens accordent donc une attention toute particulière à la mesure, l'analyse et l'amélioration de ces moments.

L'un des dispositifs les plus avancés, tel celui de Canberra, en Australie (ci-contre), comporte deux caméras synchronisées placées au-dessus et en dessous de la surface de l'eau. Le plot de départ est équipé d'une plate-forme de force, c'est-à-dire de capteurs capables de mesurer, dans les trois directions de l'espace, les forces que le nageur transmet au plot au moment du plongeon. Ces forces sont visualisées en temps réel sur un diagramme et peuvent



Le plot de départ (ici à l'Institut australien du sport, à Canberra) est équipé de capteurs de force. Des points sur le corps de l'athlète facilitent l'analyse biomécanique des enregistrements vidéo.

être superposées aux enregistrements vidéo, sous la forme d'un vecteur. Les grandeurs cinématiques telles que l'angle de pénétration dans l'eau ou la distance parcourue sont aussi mesurées directement sur la vidéo grâce à des logiciels d'analyse biomécanique. Une série de barrières magnétiques situées à intervalles réguliers dans la ligne de nage permet de mesurer les temps de passage. Au total, plus de 30 paramètres sont pris en

compte et enregistrés dans une base de données qui contient des informations sur les performances de centaines d'athlètes.

Le système prévoit enfin une visualisation en temps réel ou après un bref intervalle sur un écran en bord de piscine, afin que l'athlète puisse revoir quasi immédiatement sa performance. La mémoire exacte du geste effectué reste en effet imprimée dans le cerveau du sportif moins d'une minute.